پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی به کمک معیارهای شکست نرم در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های آلومینیومی*

سیدجلال هاشمی[۱]   حسن مسلمی نائینی[۲]   غلامحسین لیاقت[۳]   حامد دیلمی عضدی[٤]   امیر نعمتی فقیر[۵]

چکیده *منحنی حد شکل‌دهی از ابزارهای مهم در برآورد شکل‌پذیری ورق‌های فلزی تحت بارگذاری‌های مختلف می‌باشد. در این مقاله، بالج آزاد لوله‌های آلومینیومی با آلیاژ AA6065 برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. یک دستگاه بالج آزاد با طول بالج ثابت و قابلیت اعمال تغذیه‌ی محوری نیز برای بررسی صحت نتایج عددی ساخته شده است. در این مطالعه هفت معیار شکست نرم برای پیش‌بینی زمان و محل وقوع ترکیدگی لوله در فرآیند هیدروفرمینگ استفاده شده است. ابتدا آزمایش کشش تک محوری در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد تا ثابت‌های معیارهای شکست به‌دست آیند. برای به‌دست آوردن نقاط مختلف کرنشی منحنی حد شکل‌دهی مسیرهای بارگذاری تغییر فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری متفاوتی بر روی لوله اعمال شده است. با به‌کارگیری مسیرهای بارگذاری و معیارهای شکست منحنی حد شکل‌دهی به‌دست آمده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. منحنی به‌دست آمده به‌وسیله‌ی معیار شکست نرم آیادا به‌ترین تطابق را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که پیش‌بینی همه‌ی معیارهای شکست در حالت کرنشی که مشابه با آزمایش کشش تک‌محوری است، با همدیگر برابر می‌باشد. با توجه به نتایج، معیارهایی که در آن‌ها تأثیر تنش میانگین در شکست در نظر گرفته شده‌اند، برای پیش‌بینی ترکیدگی در هیدروفرمینگ مناسب‌تر می‌باشند.*

واژه‌های کلیدی هیدروفرمینگ لوله، معیار شکست نرم، منحنی حد شکل‌دهی.

Prediction of Forming Limit Curve Using Ductile Fracture Criteria in Hydrofoming of Aluminum Tubes

S.J. Hashemi   H. MoslemiNaeini   G.H. Liaghat   H. DeilamiAzodi   A. NematiFaghir

Abstract *Forming limit curve (FLC) is an important tool for evaluation of formability of sheet metals subjected to different loading. Free bulge of aluminume tubes has been investigated numerically to obtain FLC. To verify the numerical results one experimental setup has been manufactured which has the ability of controlling the internal pressure and axial feed. In this study, time and zone of bursting in tube hydroforming is predicted using seven ductile fracture criteria. For calibration of these criteria, the uniaxial tension is simulated in Abaqus/Explicit. Different loading curves are applied on tube to obtain the different points of FLC. Predicted FLCs by ductile fracture criteria have been compared with experimental results. The FLC which is predicted by Ayada' s criterion has best match to experimental one. Results show that Prediction of all criteria are the same in strain position which is similar to uniaxial tension. Based on the results, criteria which apply the effect of average stress in prediction of dutile fracture are more appropriate for tube hydroforming process.*

Key Words Tube hydroforming, Ductile fracture criterion, Forming limit curve.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۵/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۵/۲۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استاد،گروه ساخت وتولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

(۳) استاد، گروه طراحی کاربردی، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

(٤) استادیار، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اراک.

(۵) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

مقدمه

هیدروفرمینگ لوله به‌دلیل نیاز به تولید قطعات سبک و استحکام بالا در صنایع هوافضا، خودروسازی، هواپیماسازی و کشتی‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. از بین آلیاژهای موجود، آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم با نسبت استحکام به وزن بالا برای رسیدن به نیاز ذکر شده مناسب‌تر می‌باشند. در فرآیند هیدروفرمینگ، یک لوله با شکل ساده و یا با یک پیش‌فرم به‌کمک اعمال فشار داخلی به سطح داخلی لوله و تغذیه‌ی محوری به دو انتهای لوله شکل حفره‌ی داخلی قالب را به‌خود می‌گیرد. بالج آزاد لوله فرآیندی است که برای تعیین مقدار هیدروفرم‌پذیری لوله‌ها انجام می‌شود. مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی زیادی در مورد شکل‌پذیری لوله در فرآیند هیدروفرمینگ صورت گرفته است. احمد و همکارانش [1] یک روش تحلیلی برای برآورد پارامترهای مانند فشار، نیروی محوری و نیروی بستن قالب در فرآیند بالج ارائه دادند. آن‌ها هم‌چنین اصولی را برای طراحی قالب‌ها و ابزار مطرح کردند. سوکولوسکی و همکاران [2] روشی تحلیلی- تجربی برای به‌دست آوردن منحنی تنش- کرنش از طریق آزمایش بالج آزاد توسعه دادند.

یک مدل ریاضی برای تغییر شکل پلاستیک لوله حین فرآیند بالج توسط هوانگ و لین [3] ارائه شد. آن‌ها در این مدل سطح لوله را به‌صورت بیضی‌گون فرض کردند و اثر نازک‌شدگی غیر یکنواخت در محل بالج و اصطکاک بین لوله و قالب را نیز در نظر گرفتند. زینگ و ماکینوچی [4] مسیر تغییر شکل بهینه را برای لوله‌های همسانگرد و غیر همسانگرد تحت فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری به‌دست آوردند. در مطالعه‌ی آن‌ها تأثیر مسیر تغییر شکل، خواص ماده و نسبت طول به قطر فعال بر نحوه‌ی شروع و توسعه‌ی چروکیدگی مورد بررسی قرار گرفت. دونالد و همکارانش [5] شبیه‌سازی سه‌بعدی بالج آزاد لوله را تحت تأثیر فشار داخلی یک واسطه سخت مورد بررسی قرار دادند و تأثیر تغییر ضریب اصطکاک بین واسطه و لوله را بر روی فرآیند آزمایش کردند. کیم و همکاران [6] برای پیش‌بینی ترکیدگی در بالج آزاد، این فرآیند را شبیه‌سازی کردند. آنها به این منظور از معیار شکست نرم اویانه براساس تابع پتانسیل درجه دوم هیل استفاده کردند. در این مطالعه تأثیر خواص ماده در ناحیه‌ی جوش نیز در نظر گرفته شد.

سانگ و همکاران [7] برای پیش‌بینی شروع گلویی شدن در فرآیند بالج از معیار سویفت و معیار شکست نرم کوکرافت و لاتهام استفاده کردند. هوانگ و همکاران [8] با اندازه‌گیری هم‌زمان فشار داخلی و ارتفاع بالج در بالاترین نقطه، یک مدل تحلیلی جدید برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی لوله ارائه دادند. یوشیدا و کوابارا [9] وابستگی منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های فولادی را به مسیر کرنش برای مسیرهای تنشی خطی و ترکیبی به وسیله‌ی یک دستگاه کشش- فشار مورد بررسی قرار دادند. جانسون و همکاران [10] در مقاله‌ای همه‌ی روش‌های عددی و تحلیلی به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی را مورد مطالعه قرار دادند و برای یک قالب مخروطی به کار گرفتند.

در این مقاله ابتدا به معیارهای شکست مورد استفاده برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی اشاره شده و سپس با انجام آزمایش کشش تک‌محوری و شبیه‌سازی آن ثابت‌های مربوط به این معیارها استخراج شده است. در مرحله بعد آزمایش بالج لوله‌های آلومینیومی آلیاژ AA6065 در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است و مسیرهای بارگذاری فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی روی لوله اعمال شده‌اند. سپس با استفاده از معیارهای شکست نرم منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

معیارهای شکست نرم

به‌منظور انتخاب به‌ترین معیارشکست نرم برای پیش‌بینی ترکیدگی در فرآیند بالج آزاد شش معیار مورد بررسی قرار گرفته است. این معیارها براساس متغیرهای گوناگونی مانند کرنش پلاستیک، تنش هیدرواستاتیک، ماکزیمم تنش اصلی و از این قبیل شکست را پیش‌بینی می‌کنند.

معیار کرنش پلاستیک معادل. در این معیار فرض می‌شود وقتی که مقدار کرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ای به مقدار بحرانی C_1 رسید، شکست رخ خواهد داد.

$$\bar{\varepsilon}_P = C_1 \quad (۱)$$

مقدار کرنش پلاستیک معادل برای یک ماده تراکم‌ناپذیر با رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود.

$$\bar{\varepsilon}_P = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}{}^{P}\varepsilon_{ij}{}^{P}} = \sqrt{\frac{2}{9}\left((\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_1-\varepsilon_3)^2\right)} \quad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، $\varepsilon_{ij}{}^{P}$ مؤلفه‌های تانسور کرنش پلاستیک و ε_1، ε_2 و ε_3 کرنش‌های پلاستیک اصلی می‌باشند [11]. در حالت کشش تک‌محوری C_1 برابر کرنش در لحظه‌ی شکست می‌باشد.

معیار فرودنتال. فرودنتال [12] پیشنهاد کرد که آغاز و انتشار شکست در ماده به سطح انرژی کرنشی، که نمی‌تواند پیش از آزاد شدن در اثر ایجاد جدایش در ماده، به‌صورت گرما تلف گردد، بستگی دارد. در واقع شکست راهکار جایگزینی است که انرژی کرنشی برای آزاد شدن برمی‌گزیند. بنابراین معیار شکست می‌تواند تنها یک معیار انرژی باشد که مقداری بحرانی برای انرژی واپیچشی ذخیره شده در جسم تا لحظه‌ی شکست تعریف نماید. در نتیجه معیار شکست برای مواد همسانگرد می‌تواند بر حسب پارامترهای نامتغیر تنش یا کرنش بیان گردد. معیار انرژی یا کار پلاستیک کلی به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma}\, d\bar{\varepsilon} = C_2 \quad (۳)$$

که $\bar{\sigma}$ تنش مؤثر، $d\bar{\varepsilon}$ جزء کرنش مؤثر، $\bar{\varepsilon}_f$ کرنش مؤثر در لحظه‌ی شکست و C_2 مقدار بحرانی معیار شکست می‌باشد. در حالت ساده آزمایش کشش تک‌محوری مقدار C_2 برای معیار انرژی برابر با سطح زیر منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی خواهد بود. در این معیار شکل گلویی تأثیری بر کرنش شکست ندارد.

معیار کوکرافت و لاتهام. کوکرافت و لاتهام [13] معیار شکستی بر مبنای نرمی حقیقی یا کرنش طبیعی در زمان شکست پیشنهاد کردند. مطابق این معیار، شکست در مواد نرم زمانی رخ می‌دهد که سطح زیر منحنی تنش اصلی ماکزیمم (σ^*) بر حسب کرنش مؤثر به مقدار ثابت C_3 برسد.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma^* d\bar{\varepsilon} = C_3 \quad (٤)$$

معیار اُه. شکل بدون بعد شده‌ی این معیار توسط اُه، چن و کوبایاشی [14] به‌صورت زیر ارائه شده است. در این معیار تأثیر هر دو متغیر $\bar{\sigma}$ و σ^* در نظر گرفته شده است.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} = C_5 \quad (٥)$$

معیار آیادا. آیادا [15] معیاری را توسعه داد که در آن تأثیر تنش هیدرواستاتیک یا تنش میانگین (σ_m) نیز در شروع شکست در نظر گرفته شده است. در واقع این

معیـار بـا جـایگزینی σ_m بـه جـای σ^* در معیـار اُه به‌دست آمده است.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} = C_5 \qquad (٦)$$

معیار بروزو. وابسـتگی کـرنش شکسـت بـه هـر دو پـارامتر بـزرگ‌تـرین تـنش اصـلی کششـی و تـنش هیدرواستاتیکی با بهبود تجربی معیار کوکرافت توسـط بروزو، دِلوکا و رندینا [16] مطرح گردید.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma^*}{3\left(\sigma^* - \sigma_m\right)} d\bar{\varepsilon} = C_6 \qquad (٧)$$

معیـار رایـس و تریسـی. رایـس و تریسـی [17] بـا مطالعه‌ی رشد حفـره‌هـای کـروی در مـاده‌ی صـلب- پلاستیک، معیاری برای پیش‌بینی شکست نرم پیشـنهاد نمودنـد. نتـایج نشـان داد کـه بـا افـزایش تـنش هیدرواستاتیکی کششـی شکسـت نـرم بـه‌سـرعت رخ خواهد داد.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \exp\left(\frac{a\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\varepsilon} = C_7 \qquad (٨)$$

بر اساس تئوری $a = 1.5$ خواهد بود.

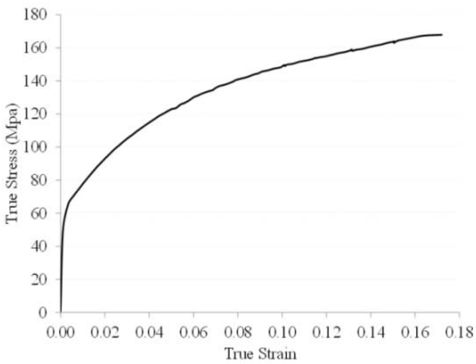
تعیین خواص ماده

در این مقاله تغییـر شـکل لولـه‌هـای آلومینیـومی آلیـاژ AA6065 مورد بررسی قرار گرفته که ترکیب شـیمیایی آن در جدول (١) آمده است. لوله‌هـای مـورد آزمـایش دارای قطر خارجی ٤٠ و ضخامت اولیه‌ی ١/٥ میلی‌متر می‌باشند.

نمونه‌ی کشش در راسـتای طـولی لولـه بـر طبـق استاندارد *ASTM-E8M* تهیـه شـده و آزمـایش کشـش تک‌محوری بر روی آن به‌وسیله‌ی دستگاه کشش انجام شده است. منحنی تنش- کرنش حقیقی به‌دسـت آمـده در شکل (١) نمایش داده شده است.

جدول ١ ترکیب شیمیایی لوله (٪)

Al	Mg	Si	Fe	Zn	Cu
Base	0.47	0.44	0.30	0.08	0.06
Mn	Pb	Ti	Sn	Ni	Ga
0.03	0.03	0.03	0.017	0.02	0.01

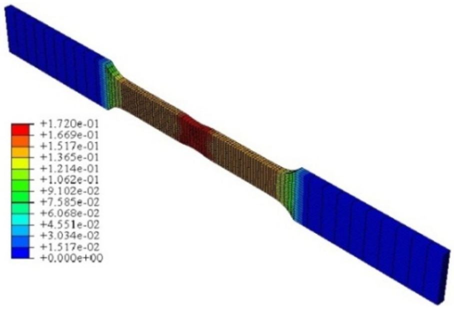


شکل ١ منحنی تنش- کرنش حقیقی ماده

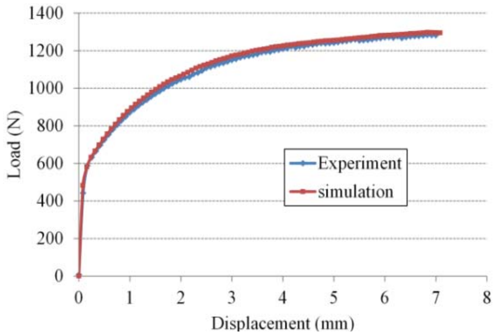
برای به‌دست آوردن دقیـق ثابـت‌هـای معیارهـای شکست، آزمایش کشش تک محوری شبیه‌سازی شـده است. کشش نمونه در شبیه‌سازی تا زمانی ادامه می‌یابد تا کرنش اصلی ماکزیمم در یک المان به مقدار کـرنش شکست در حالت تجربی برسد [18]. ماکزیمم کـرنش اصلی حقیقی اندازه‌گیری شده با آزمایش کشـش برابـر ٠/١٧٢ می‌باشد. شبیه‌سازی آزمایش کشش تک‌محوری در نرم‌افزار آباکوس و با ابعاد منطبق بر نمونه‌ی تجربی و شرایط یکسان بارگذاری با المان‌هـای نـوع C3D8R انجام شده است. بـرای اطمینـان از نتـایج شـبیه‌سـازی منحنی نیـرو- جابـه‌جـایی بـا حالـت تجربـی مقایسـه می‌شود. در صورت تطابق منحنی نیرو- جابه‌جـایی در نمونه‌ی تجربی و شبیه‌سازی، با استفاده از مقادیر تـنش و کرنش در المانی که به کرنش شکست رسیده، مقادیر

ثابت‌های معیارهای شکست به‌دست می‌آیند. ثابت‌های معیارهای شکست معرفی شده در جدول (۲) آمده است. شکل (۲) نمونه‌ی کشش را شبیه‌سازی نمایش می‌دهد.

مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی آزمایش کشش در شبیه‌سازی و حالت تجربی در شکل (۳) نشان داده شده است که تطابق خوبی دارند.



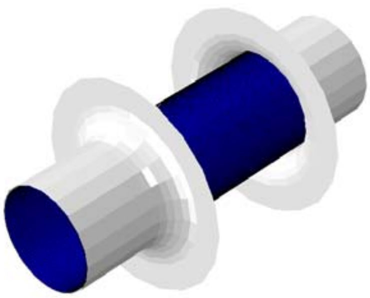
شکل ۲ نمونه‌ی کشش



شکل ۳ مقایسه منحنی نیرو- جابه‌جایی شبیه‌سازی و تجربی

شبیه‌سازی بالج آزاد لوله

شبیه‌سازی فرآیند بالج آزاد لوله در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به‌منظور به‌دست آوردن حداکثر مقدار بالج و مقادیر کرنش در هنگام ترکیدگی به‌کمک معیارهای شکست انجام شده است. قالب‌ها به‌صورت سطوح صلب مدل شده و ضریب اصطکاک بین قالب و لوله ۰/۰۵ در نظر گرفته شده و برای مدل کردن لوله از المان نوع S4R استفاده شده است. فاصله‌ی آزاد بالج بین قالب‌ها ٦۰ میلی‌متر و شعاع گوشه‌ی قالب‌ها ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. مدل شبیه‌سازی بالج آزاد در شکل (٤) نشان داده شده است.

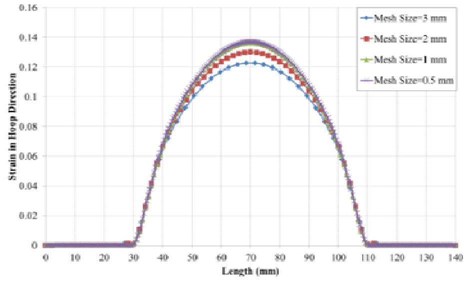


شکل ٤ مدل شبیه‌سازی بالج آزاد لوله

حساسیت نتایج به‌اندازه‌ی المان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور اندازه‌ی المان‌ها تغییر کرده و مقدار کرنش محیطی برای یک بارگذاری با فشار داخلی نهایی ۱۲ مگاپاسکال و بدون تغذیه‌ی محوری به‌دست آمده است (شکل ۵). براساس نتایج به‌دست آمده و کاهش زمان شبیه‌سازی المان با اندازه‌ی یک میلی‌متر برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است.

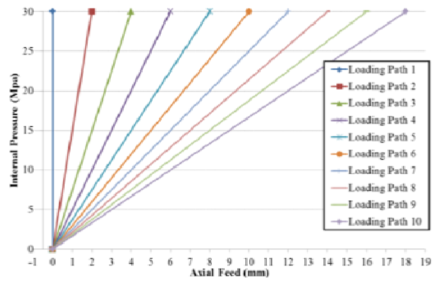
جدول ۲ ثابت‌های معیارهای شکست

معیار شکست نرم	کرنش پلاستیک	فرودنتال	کوکرافت و لاتهام	اه	آیادا	بروزو	رایس و تریسی
ثابت	$C_1 =$ ۰.۱۷۲٤	$C_2 =$ ۲۳.۱۸۵	$C_3 =$ ۲۳.۱٦۷	$C_4 =$ ۰.۱۷۱۵	$C_5 =$ ۰.۰۵۷۰۷	$C_6 =$ ۰.۱۷۱۵	$C_7 =$ ۰.۲۸۳۵



شکل ۵ مطالعه اثر اندازه المان

برای به‌دست آوردن نقاط منحنی حد شکل‌دهی باید حالت‌های مختلف بارگذاری ترکیبی از فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری روی لوله اعمال شود. به این منظور از منحنی بارگذاری فشار و تغذیه‌ی محوری خطی استفاده شده است. هشت منحنی بارگذاری به‌کار گرفته شده در شکل (٦) نمایش داده شده‌اند.



شکل ٦ منحنی‌های بارگذاری

دستگاه بالج آزاد لوله

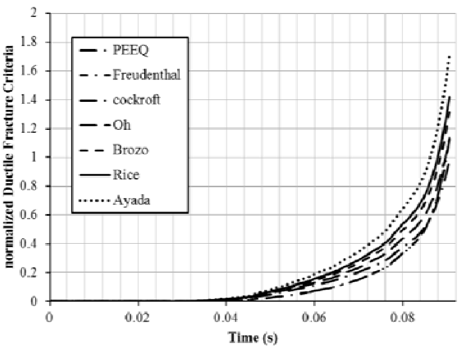
یک دستگاه با قابلیت کنترل فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری طراحی و ساخته شد. از این دستگاه به‌منظور انجام بالج آزاد لوله‌های آلومینیومی تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف استفاده شد و حداکثر ارتفاع بالج منحنی حد شکل دهی و پارگی به‌دست آمدند. دستگاه بالج آزاد در شکل (٧) نشان داده شده است. فشار داخلی به‌وسیله‌ی فشارسنج و تغذیه‌ی محوری به‌وسیله‌ی یک LVDT که به رایانه متصل شده کنترل می‌شود. تغذیه‌ی محوری توسط جک‌های هیدرولیکی در دو طرف انجام می‌شود. برای اعمال فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری از دو پمپ هیدرولیکی استفاده شده است.



شکل ٧ شکل دستگاه بالج آزاد لوله

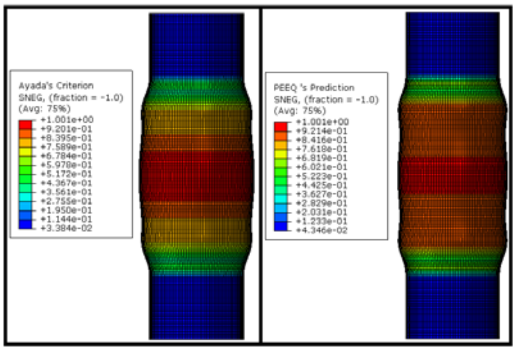
نتایج و بحث

با انجام شبیه‌سازی بالج آزاد لوله تحت منحنی‌های بارگذاری در نظر گرفته شده، زمان ترکیدگی توسط معیارهای مختلف شکست نرم معرفی شده پیش‌بینی می‌شود. به این منظور مقادیر توابع معیارهای شکست نرم در نقطه‌ی حداکثر بالج لوله که بیش‌ترین احتمال ترکیدگی را دارد، به‌دست می‌آید و با مقدار ثابت مربوط به آن معیار مقایسه می‌گردد. به این ترتیب اگر نسبت دو مقدار معیار شکست و ثابت آن بالاتر از یک شود، شکست پیش‌بینی خواهد شد. شکل (٨) نمونه‌ای از پیش‌بینی معیارها را نمایش می‌دهد که معیار کرنش شکست زودتر از بقیه معیارها ترکیدگی را پیش‌بینی کرده و معیار آیادا دیرتر از بقیه معیارها وقوع شکست را پیش‌بینی کرده است.



شکل ٨ پیش‌بینی زمان وقوع ترکیدگی لوله توسط معیارهای شکست نرم

پیش‌بینی دو معیار کرنش شکست و آیادا برای منحنی بارگذاری ۱۰ در شکل (۹) مورد مقایسه قرار گرفته است. توزیع پیش‌بینی دو معیار مذکور به‌صورت کانتور روی قطعه نشان داده شده است. در هر دو مورد وسط لوله که دارای ارتفاع بیش‌تری است، سریع‌تر به معیار شکست رسیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ارتفاع بالج در زمانی که معیار کرنش شکست ترکیدگی لوله را پیش‌بینی کرده است خیلی کم‌تر از مقدار ارتفاع مربوط به معیار آیادا می‌باشد.

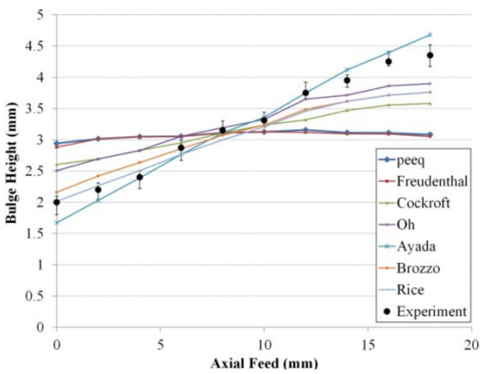


شکل ۹ کانتور پیش‌بینی دو معیار کرنش شکست و آیادا

شکل (۱۰) حداکثر ارتفاع بالج را که توسط معیارهای مختلف پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار می‌دهد. حداکثر ارتفاع بالج از رابطه‌ی (۹) به‌دست می‌آید. در این رابطه D و D_0 به‌ترتیب قطر اولیه‌ی لوله و قطر لوله در لحظه‌ی ترکیدگی می‌باشند.

$$\text{Bulge Height}(mm) = \frac{D - D_0}{2} \quad (۹)$$

با افزایش تغذیه‌ی محوری ماده راحت‌تر به ناحیه‌ی بالج لوله رسیده و نازک‌شدگی و درنهایت ترکیدگی دیرتر اتفاق می‌افتد، در نتیجه ارتفاع بالج افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، دو معیار فرودنتال و کرنش پلاستیک برای همه‌ی مقادیر تغذیه‌ی محوری تقریباً یک ارتفاع بالج را پیش‌بینی کرده‌اند. در حالی که همان‌طور که گفته شد افزایش تغذیه‌ی محوری، بیش‌تر شدن ارتفاع بالج را به‌دنبال خواهد داشت. پیش‌بینی همه‌ی معیارها در تغذیه‌ی محوری ۱۰ میلی‌متر تقریباً برابر می‌باشد. در تغذیه‌های محوری کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر پیش‌بینی دو معیار رایس و آیادا نزدیک به نتایج تجربی می‌باشد اما در تغذیه‌های محوری بالای ۱۰ میلی‌متر ارتفاع بالج تجربی بالاتر از پیش‌بینی همه‌ی معیارها به‌جز معیار آیدا است. با توجه به فاصله‌ی کم نتایج تجربی و پیش‌بینی همه‌ی معیارها می‌توان گفت به‌ترین پیش‌بینی را برای حداکثر ارتفاع بالج معیارآیادا داشته است.



شکل ۱۰ پیش‌بینی حداکثر ارتفاع بالج توسط معیارهای شکست

برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی طبق پیش‌بینی معیارهای شکست نرم، مقدار کرنش‌های محیطی و طولی در المانی که دچار شکست محاسبه می‌شوند. به این منظور از روابط (۱۲-۱۰) استفاده شده است. t و t_0 به‌ترتیب ضخامت لوله در زمان ترکیدگی و ضخامت اولیه‌ی لوله می‌باشند. ε_t، ε_θ و ε_l نیز به‌ترتیب برابر با کرنش در راستای ضخامت لوله، کرنش محیطی و کرنش طولی در زمان ترکیدگی می‌باشند.

$$\varepsilon_t = \ln(t/t_0) \quad (۱۰)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln(D/D_0) \quad (۱۱)$$

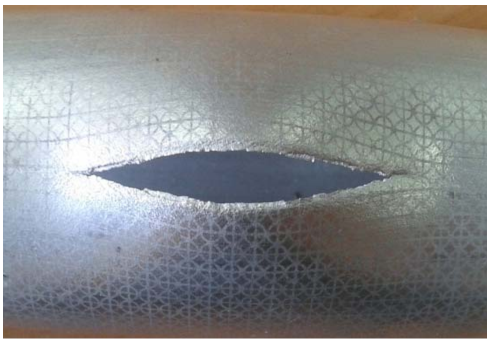
$$\varepsilon_l = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_t) \qquad (۱۲)$$

برای اندازه‌گیری کرنش‌ها در کار تجربی نیز یـک طرح شبکه‌ای دایره‌ای منظم با قطر دو میلی‌متر بر روی نمونه‌ها حک شد. پس از انجـام آزمـایش بـالج، تغییـر شکل با اندازه‌گیری قطر دایره‌هـا در راسـتای طـولی و محیطی لوله‌ی کرنش‌ها بـه‌دسـت آمدنـد. نمونـه‌هـای تجربی و طرح شبکه‌ای اندازه‌گیـری کـرنش در شـکل (۱۱) نشان داده شده است.



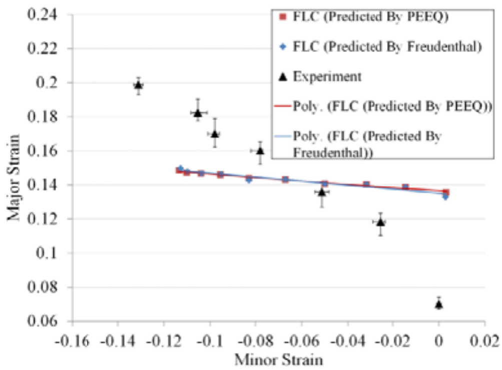
شکل ۱۱ نمونه‌های تجربی

تغییر قطر دایره‌های حک شده بر لولـه در یکـی از نمونه‌های تجربی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ تغییر قطر دایره‌ای حک شده بر روی لوله

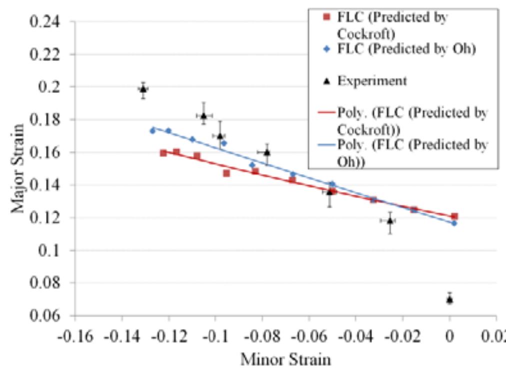
نمودار حد شکل‌دهی پـیش‌بینـی شـده توسـط دو معیار شکست کرنش پلاسـتیک معـادل و فرودنتـال در شکل (۱۳) با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته‌انـد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌بینی دو معیـار ذکـر شده اختلاف خیلی زیادی با نتایج تجربی دارد. این دو معیار مقادیر کرنش منحنی حـد شـکل دهـی را بسـیار نزدیک به هم پیش‌بینی کرده‌اند. دلیل این شباهت نتایج را می‌توان مرتبط به افزایشی بودن کرنش و اسـتفاده از سطح تسلیم فون میسز دانست. در هنگـام شـبیه‌سـازی آزمـایش کشـش بـرای بـه‌دسـت آوردن ثابـت‌هـای معیارهای شکست از معیـار فـون میسـز اسـتفاده شـده است. در واقع ثابت معیار شکست فرودنتال، سطح زیر منحنی تنش –کرنش حقیقی ماده مـی‌باشـد. در فرآینـد بالج آزاد، هنگامی که لوله تغییر شکل می‌دهد و کرنش پلاستیک ماده افزایش پیدا می‌کند، تنش در المـانی کـه بیش‌ترین تغییر شکل را دارد، نیز مطابق با آن کرنش از روی منحنی تنش- کرنش بالا می‌رود. در نتیجه منحنی تنش- کرنش المانی که به کرنش شکست رسیده تقریباً مشابه با منحنی تنش- کرنش ماده می‌باشد و سطح زیر آن برابر با ثابت معیار فرودنتال خواهد شد.



شکل ۱۳ منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با معیارهای کرنش پلاستیک معادل و فرودنتال

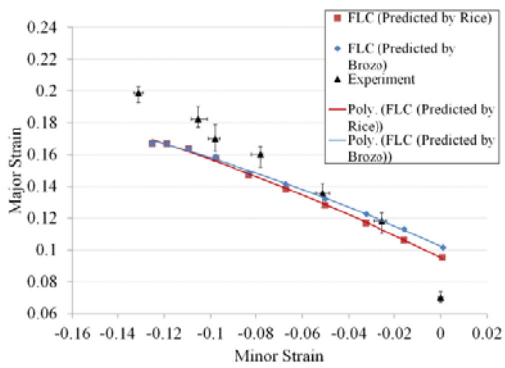
بـا ایـن‌کـه بایـد در سـمت راسـت منحنـی حـد شکل‌دهی، نسبت بالج زیادتر شود و در واقع با منفی‌تر شدن کرنش طولی در المانی که بیش‌ترین تغییر شـکل را داشـته و در وسـط لولـه قـرار دارد، مقـدار کـرنش

محیطی افزایش یابد، دو معیار کرنش پلاستیک معادل و فرودنتال پیش‌بینی مناسبی ندارند. پیش‌بینـی معیارهـای کوکرافت و اُه در شـکل (١٤) نشـان داده شـده اسـت. همان‌طور کـه مشـاهده مـی‌شـود، همـه‌ی معیارهـا در محدوده‌ی کرنشی طولی ۰/۰۷- پیش‌بینی برابری دارند. در این حالت کرنشـی، در المـانی کـه دچـار شکسـت می‌شود و در وسط لوله قرار دارد، تـنش‌هـا در صـفحه حالت تک‌محوری پیدا می‌کند یعنی یکی از تنش‌هـا در صفحه نزدیک به صفر است. در نتیجه چون این حالت تنشی شبیه آزمایش کشـش تـک محـوری مـی‌باشـد و ثابت‌های معیارهای شکست از نتیجه‌ی آزمایش کشش به‌دست آمده، پیش‌بینـی همـه‌ی معیارهـا تقریبـاً برابـر است. پیش‌بینی معیارهای کوکرافت و اُه نیـز بـا نتـایج تجربی اختلاف زیادی دارند. ولی پیش‌بینی معیار اُه بـه نتایج تجربی نزدیک‌تر شده است.



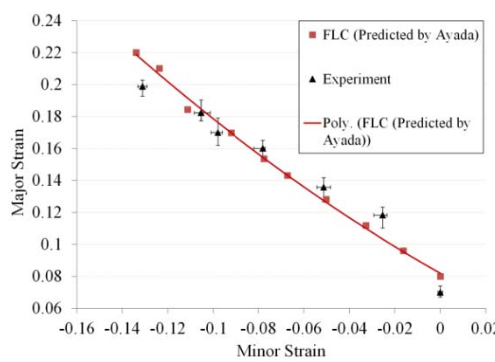
شکل ١٤ منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با معیارهای کوکرافت و اُه

پیش‌بینی معیارهای شکست نرم رایس و بروزو در شکل (١٥) نشان داده است. در این دو معیار تأثیر تنش میانگین در پیش‌بینی شکست در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاربرد تنش میـانگین، نتایج پیش‌بینی معیارهـای شکسـت بـه نتـایج تجربـی نزدیک‌تر شده است.



شکل ١٥ منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با معیارهای رایس و بروزو

از بین معیارهای شکسـت اسـتفاده شـده بـه‌تـرین پیش‌بینی برای منحنی حـد شـکل‌دهـی را معیـار آیـادا داشته است. منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با این معیـار در شـکل (١٦) نشـان داده شـده اسـت. در قسمت‌های میانی منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی معیار آیادا با نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی دارد.



شکل ١٦ منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با معیارهای رایس و بروزو

نتیجه‌گیری

منحنی حد شکل‌دهـی لولـه‌هـای آلومینیـومی بـا آلیـاژ AA6063 به‌کمک معیارهای شکسـت پـیش‌بینـی شـد. ثابت‌های معیارهای شکسـت از شـبیه‌سـازی آزمـایش کشش تک‌محوری به‌دست آمدند. فرآیند بالج آزاد لوله

شبیه‌سازی شده و کرنش‌های حدی به‌دست آمدند. یک دستگاه بالج آزاد ساخته شده و نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. پیش‌بینی همه‌ی معیارها در حالت تنشی که در صفحه حالت تک‌محوری داشته باشد، با هم برابر است. از بین منحنی‌های پیش‌بینی شده به‌وسیله‌ی معیارهای شکست، معیار آیادا به‌ترین پیش‌بینی را داشته است. معیارهایی که در آن‌ها تأثیر تنش میانگین در پیش‌بینی شکست در نظر گرفته شده است، منحنی حد شکل‌دهی نزدیک‌تری به نتایج تجربی داشته‌اند. هم‌چنین نتایج نشان دادند که می‌توان با استفاده از معیار آیادا ارتفاع بالج را به‌خوبی پیش‌بینی کرد.

مراجع

1. Ahmed, M. and Hashmi, M.S.J., "Estimation of machine parameters for hydraulic bulge forming of tubular components", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 64, pp. 9–23, (1997).
2. Sokolowski, T., Gerke,K., Ahmetoglu, M. and Altan, T., "Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 98, pp. 33-40, (2000).
3. Hwang, Y.M. and Lin, Y.K., "Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process", *Journal of Material Processing Technology*, Vol.125–126, pp.821–825, (2002).
4. Xing, H.L. and Makinouchi, A., "Numerical analysis and design for tubular hydroforming", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 1009-1026, (2001).
5. Mac Donald, B.J. and Hashmi, M.S.J., "Three-dimensional finite element simulation of bulge forming using a solid bulging medium", *Finite Elements in Analysis and Design*., Vol. 37, pp. 107-116, (2001).
6. Kim, J., Kim,Y.W., Kang, B.S. and Hwang, S.M, "Finite element analysis for bursting failure prediction in bulge forming of a seamed tube", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, pp. 953–966, (2004).
7. Song, W.J., Kim, S.W., Kim, J. and Kang, B.S., "Analytical and numerical analysis of bursting failure prediction in tube hydroforming", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 164–165, pp. 1618–1623, (2005).
8. Hwang, Y. M., Yi-Kai Lin and Altan, T., "Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 343–351, (2007).
9. Yoshida, K. and Kuwabara, T.,"Effect of strain hardening behavior on forming limit stresses of steel tube subjected to nonproportional loading paths", *International Journal of Plasticity*, Vol. 23, pp. 1260–1284, (2007).
10. Jansson, M., Nilsson, L. and Simonsson, K.,"On strain localisation in tube hydroforming of aluminium extrusions", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 195, pp.3–14, (2008).
11. Ridha, H. and Marian, R., "Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp.1349–1361, (2002).
12. Freudenthal, A. M., "*The inelastic behavior of engineering materials and structures*", John Wiley & Sons, (1950).

13. Cockroft, M.G. and Latham, D.J., "Ductility and workability of metals", *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 96, pp. 33-39, (1968).
14. Oh, S.I.,Chen, C.C. and Kobayashi, S.,"Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 101, pp. 36-44, (1979).
15. Ayada, M., Higashino, T. and Mori, K.,"Central bursting in extrusion of in homogeneous materials", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 553-558, (1987).
16. Brozzo, P., de Luca, B. and Rendina, R., "A new method for the prediction of formability in metal sheets", *Proceedings of the 7th Biannual Conference of the International Deep Drawing Research Group*, (1972).
17. Rice, J.R. and Tracey, D.M., "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, pp. 201-217, (1969).
18. Zhan, M., Gu, C., Jiang, Z., Hu, L. and Yang, H., "Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes", *Computational Materials Science*, Vol. 47, pp. 353–365, (2009).